

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»  
Кафедра радиоэлектронных средств

## ***ТЕОРИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ***

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2010

УДК 002:004.056(076.5)  
ББК 32.973.202-018.2я73  
Т33

**С о с т а в и т е л и:**

А. В. Будник, В. Е. Галузо, В. М. Логин

**Р е ц е н з е н т**

заведующий кафедрой электроники учреждения образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»,  
кандидат технических наук, доцент С. В. Дробот

**Теория систем безопасности** : метод. указания к практ. занятиям для студ. спец. 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» всех форм обуч. / сост. А. В. Будник, В. Е. Галузо, В. М. Логин. – Минск : БГУИР, 2010. – 50 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-390-8.

Содержат восемь практических занятий по дисциплине «Теория систем безопасности» и рекомендации по их выполнению. Также приведен краткий теоретический материал.

**УДК 002:004.056(076.5)**  
**ББК 32.973.202-018.2я73**

**ISBN 978-985-488-390-8**

© Будник А. В., Галузо В. Е., Логин В. М.,  
составление, 2010  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1.....	4
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1.....	4
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2.....	10
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3.....	16
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4.....	23
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5.....	27
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6.....	34
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7.....	40
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8.....	43
ЛИТЕРАТУРА.....	48

## **Практическое занятие №1**

### **ПАРАЗИТНЫЕ ЕМКОСТНЫЕ СВЯЗИ**

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ анализа причин образования и оценки параметров емкостных паразитных связей (ПС).

#### **Теоретические сведения**

#### **Причины образования технических каналов утечки информации**

Работа систем информатизации и связи, а также ведение переговоров по закрытым вопросам сопровождаются возникновением электромагнитных и акустических полей, распространяющихся в различных средах (в воздухе, токопроводящих конструкциях и т. д.). Это создает определенные предпосылки для образования технических каналов утечки информации при работе различных технических средств и систем. Необходимым условием образования таких каналов является наличие опасного сигнала (т. е. сигнала, содержащего закрытую информацию) в тех полях, которые порождаются работой технических средств. Обнаружение, прием и анализ носителей опасного сигнала техническими средствами разведки позволяют несанкционированно получить закрытую информацию, обрабатываемую техническими средствами систем информатизации и связи.

Возможность образования технических каналов утечки информации в системах и средствах информатизации и связи обусловлена следующими причинами:

- наличие информационных радио-, оптических и электрических сигналов в различных технических средствах передачи и обработки информации;
- наличие нежелательных электромагнитных излучений систем и средств информатизации и связи;
- образование наводок электромагнитных излучений на различные токоведущие цепи и конструкции;
- применение специальных воздействий на элементы технических средств;
- применение различных закладных устройств;
- возникновение и распространение в окружающей среде акустических колебаний при обсуждении вопросов, содержащих секретные сведения;
- наличие случайных электроакустических преобразователей в отдельных элементах технических средств.

#### **Нежелательные электромагнитные связи**

Между двумя электрическими цепями (элементами, узлами, средствами), находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать нежелательные электромагнитные связи. Наличие таких связей приводит к тому, что сигналы, циркулирующие в одной цепи (в цепи источника наводки), по-

являются в другой электрической цепи (в цепи приемника наводки). Основными источниками возникновения нежелательных связей являются:

- ближнее электрическое поле;
- ближнее магнитное поле;
- электромагнитное поле излучения.

### Связь через ближнее электрическое и магнитное поля

Приемлемые для практики результаты получаются при рассмотрении нежелательных связей между цепями в предположении полной взаимной независимости ближнего электрического и магнитного полей. В этом случае связь между источником и приемником (рецептором) наводки через ближнее электрическое поле рассматривается как емкостная связь через малую паразитную емкость без учета появляющегося при этом магнитного поля. Связь через ближнее магнитное поле рассматривается как индуктивная связь между источником и приемником наводки через малую паразитную взаимоиндуктивность без учета появляющегося при этом электрического поля.

Емкостная и индуктивная нежелательные связи проявляются при отсутствии непосредственной связи между источником и приемником наводки. На рис. 1.1 показан случай размещения источника и приемника наводки (ИН и ПН соответственно) в отдельных экранированных отсеках.

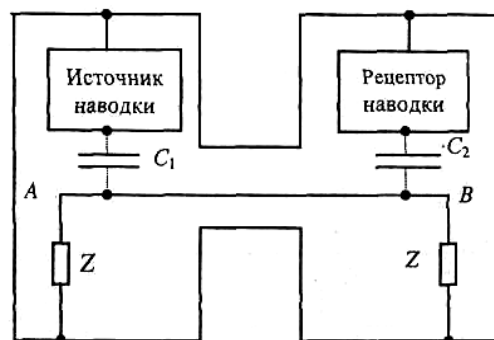


Рис. 1.1. Схема образования емкостной паразитной связи

Через оба отсека проходит провод  $AB$ , не имеющий отношения ни к источнику, ни к рецептору наводки. Этот провод имеет емкость  $C_1$ , (см. рис. 1.1) по отношению к источнику наводки и емкость  $C_2$  по отношению к рецептору наводки.

Таким образом, из-за наличия провода  $AB$  источник и приемник наводки оказываются взаимно связанными. Величина этой связи определяется значениями  $C_1$ ,  $C_2$  и полного сопротивления  $Z_{AB}$  постороннего провода относительно корпуса.

## Связь через электромагнитное поле

Электромагнитные излучения, сопутствующие работе технических средств систем информатизации и связи, распространяются в окружающее пространство. В зону действия этих излучений попадают токопроводящие элементы и конструкции, обладающие свойствами антенн. В таких случайных антеннах электромагнитное поле наводит ЭДС и ток опасного сигнала. Роль случайных антенн могут играть проводники технических средств, токоведущие элементы систем заземления, металлические корпуса аппаратуры, посторонние протяженные проводники (например, провода открытой телефонной или громкоговорящей связи, сигнализации). Токи опасных сигналов, наводимые электромагнитными полями, сопутствующими работе технических средств, распространяясь по токоведущим коммуникациям, создают реальные предпосылки утечки информации.

### Непосредственная емкостная паразитная связь

Такая связь осуществляется через ближнее электрическое поле.

Если тело  $A$  имеет напряжение  $E_{ин}$  относительно корпуса (рис. 1.2), то на теле  $B$ , связанном с телом  $A$  малой паразитной емкостью  $C_{пар}$  и являющемся паразитной наводкой (ПН), возникает напряжение  $U_{пн}$ , величина которого определяется соотношением между емкостным сопротивлением  $x_{пар} = 1/j\omega C_{пар}$  и входным сопротивлением ПН  $Z_{пн}$ . Комбинация из этих двух сопротивлений является простейшим делителем, к которому сводится любая емкостная ПС. Так как всегда  $x_{пар} \gg Z_{пн}$ , то напряжение  $U_{пн} = E_{ин}Z_{пн}/x_{пар}$ , коэффициент емкостной паразитной связи

$$\beta_e = U_{пн}/E_{ин} = Z_{пн}/x_{пар} = \omega C_{пар} Z_{пн}. \quad (1.1)$$

Отсюда следует, что влияние емкостной ПС тем больше, чем выше рабочая частота, если  $Z_{пн}$  не падает с повышением частоты.

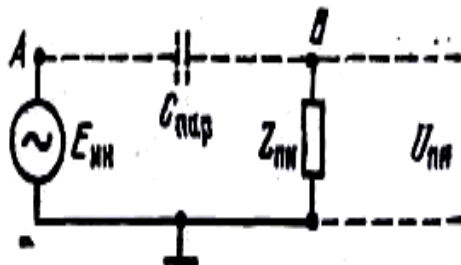


Рис. 1.2. Схема возникновения емкостной паразитной связи

Для широко распространенного в практике конструирования ТСОИ случая параллельных проводников шириной  $b$ , длиной  $l$ , находящихся на расстоянии  $a$  друг от друга, емкость связи определяется по формуле

$$C_{\text{св}} = \varepsilon\varepsilon_0 l [1 + 0,5 \lg(b/a)]. \quad (1.2)$$

### Сравнение различных видов паразитной связи

С помощью данных табл. 1.1 – 1.3 можно приближенно оценить степень влияния того или иного вида ПС. Допустим, что провода диаметром 1 мм, относящиеся к возможным ИН и ПН, проложены рядом, и на участке 200 мм расстояние между ними составляет 10 мм. В этом случае между проводами будет паразитная емкость 1,8 пФ.

Таблица 1.1

Параметры плоских медных проводников, нанесенных на одностороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Емкость между двумя одинаковыми проводниками (пФ/см) при расстоянии между ними:				
0,5 мм	0,42	0,47	0,6	0,7
1 мм	0,26	0,38	0,47	0,6
2 мм	0,21	0,28	0,38	0,5
Емкость (пФ/см) между проводом и экраном, расположенным рядом на расстоянии:				
0,5 мм	0,53	0,6	0,7	0,8
2 мм	0,32	0,4	0,46	0,6

Таблица 1.2

Параметры плоских прямых проводников, нанесенных на двухстороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Емкость (пФ/см) между двумя одинаковыми проводниками, нанесенными на обе стороны платы толщиной:				
0,5 мм	0,84	1,08	1,75	2,7
1 мм	0,66	0,75	1,08	1,75
2 мм	0,54	0,63	0,75	1,08
Емкость (пФ/см) между проводом и экраном, расположенным рядом на обе стороны платы толщиной:				
0,5 мм	1,32	1,68	2,4	3,35
1 мм	0,98	1,17	1,68	2,4
2 мм	0,9	0,9	1,17	1,68

Ориентировочные значения параметров медного прямого провода  
длиной 100 мм

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Емкость (пФ/см) между проводом и параллельным ему корпусом на расстоянии: 10 мм	0,9	1,4	1,6	1,8
100 мм	0,7	0,8	0,9	1,0
Емкость (пФ/см) между двумя параллельными проводами при расстоянии 10 мм	0,5	0,75	0,9	1,2

**Пример.** Если  $C_{\text{пар}} = 1$  пФ и  $Z_{\text{ПН}} = 1$  кОм, то на высшей частоте УНЧ 5 кГц:

$$\beta_e = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 3,14 \cdot 10^{-5} = 0,00314 \%$$

В видеоусилителе, высшая частота которого достигает 5 МГц, этот коэффициент возрастает в 1000 раз, т. е.  $\beta_e = 3,14 \%$ .

Часто ПН имеет чисто емкостное входное сопротивление  $Z_{\text{ПН}} = 1/j\omega C_{\text{ПН}}$ . Тогда делитель (см. рис. 1.2) будет емкостным, и коэффициент ПС

$$\beta_e = C_{\text{пар}}/C_{\text{ПН}} \quad (1.3)$$

не зависит от частоты.

Для ослабления влияния электрической связи в аппаратуре следует:

- 1) максимально разносить цепи приемника и источника наводки, что снижает  $C_{\text{св}}$ ;
- 2) компоновать цепи приемника и источника наводки так, чтобы емкость связи  $C_{\text{св}}$  между ними была минимальной (например, располагать провода линий источника и приемника наводки под углом, близким к  $90^\circ$ );
- 3) уменьшать размеры цепей источника и приемника наводки.

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают причины образования емкостной паразитной связи.
2. По заданию преподавателя определяют величину паразитной емкости для конкретных значений, указанных в табл. 1.1. Длина проводников варьируется от 50 до 100 мм.
3. По заданию преподавателя определяют величину паразитной емкости для конкретных значений, указанных в табл. 1.2. Длина проводников варьируется от 50 до 100 мм.



4. По заданию преподавателя определяют величину паразитной емкости для конкретных значений, указанных в табл. 1.3. Длина проводов варьируется от 5 до 10 м.

5. По заданию преподавателя для двух фиксированных частот (например 1 кГц и 1 МГц) и сопротивления приемника наводки (например 1 и 2 кОм) для каждого значения паразитной емкости рассчитывают коэффициент паразитной емкостной связи.

6. Анализируют полученные результаты (указывают уровень наведенного паразитного сигнала) и делают выводы о снижении влияния емкостной паразитной связи.

7. Расчеты дополняются эскизами расположения проводников с указанием размеров.

## Практическое занятие №2

### ПАРАЗИТНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ СВЯЗИ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ анализа причин образования и оценки параметров индуктивных паразитных связей.

#### Теоретические сведения

#### Причины образования технических каналов утечки информации

Работа систем информатизации и связи, а также ведение переговоров по закрытым вопросам сопровождаются возникновением электромагнитных и акустических полей, распространяющихся в различных средах (в воздухе, токопроводящих конструкциях и т. д.). Это создает определенные предпосылки для образования технических каналов утечки информации при работе различных технических средств и систем. Необходимым условием образования таких каналов является наличие опасного сигнала (т. е. сигнала, содержащего закрытую информацию) в тех полях, которые порождаются работой технических средств. Обнаружение, прием и анализ носителей опасного сигнала техническими средствами разведки позволяют несанкционированно получить закрытую информацию, обрабатываемую техническими средствами систем информатизации и связи.

Возможность образования технических каналов утечки информации в системах и средствах информатизации и связи обусловлена следующими причинами:

- наличие информационных радио-, оптических и электрических сигналов в различных технических средствах передачи и обработки информации;
- наличие нежелательных электромагнитных излучений систем и средств информатизации и связи;
- образование наводок электромагнитных излучений на различные токоведущие цепи и конструкции;
- применение специальных воздействий на элементы технических средств;
- применение различных закладных устройств;
- возникновение и распространение в окружающей среде акустических колебаний при обсуждении вопросов, содержащих секретные сведения;
- наличие случайных электроакустических преобразователей в отдельных элементах технических средств.

#### Нежелательные электромагнитные связи

Между двумя электрическими цепями (элементами, узлами, средствами), находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать нежелательные электромагнитные связи. Наличие таких связей приводит к тому, что сигналы, циркулирующие в одной цепи (в цепи источника наводки), появляются в другой электрической цепи (в цепи приемника наводки). Основными источниками возникновения нежелательных связей являются:

- ближнее электрическое поле;
- ближнее магнитное поле;
- электромагнитное поле излучения.

### Связь через ближнее электрическое и магнитное поля

Приемлемые для практики результаты получаются при рассмотрении нежелательных связей между цепями в предположении полной взаимной независимости ближнего электрического и магнитного полей. В этом случае связь между источником и приемником (рецептором) наводки через ближнее электрическое поле рассматривается как емкостная связь через малую паразитную емкость без учета появляющегося при этом магнитного поля. Связь через ближнее магнитное поле рассматривается как индуктивная связь между источником и приемником наводки через малую паразитную взаимоиндуктивность без учета появляющегося при этом электрического поля.

Емкостная и индуктивная нежелательные связи проявляются при отсутствии непосредственной связи между источником и приемником наводки. На рис. 2.1 показан случай размещения источника и приемника наводки в отдельных экранированных отсеках.

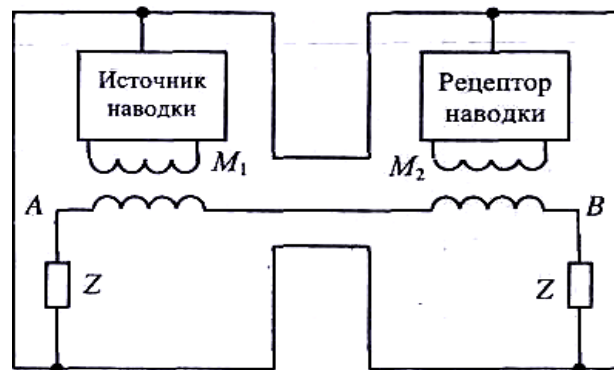


Рис. 2.1. Схема образования индуктивной паразитной связи

Через оба отсека проходит провод  $AB$ , не имеющий отношения ни к источнику, ни к рецептору наводки. Этот провод имеет взаимную индуктивность  $M_1$  по отношению к источнику наводки и взаимную индуктивность  $M_2$  по отношению к рецептору наводки.

Таким образом, из-за наличия провода  $AB$  источник и приемник наводки оказываются взаимно связанными. Величина этой связи определяется значениями  $M_1$ ,  $M_2$  и полного сопротивления  $Z_{AB}$  постороннего провода относительно корпуса.

## Связь через электромагнитное поле

Электромагнитные излучения, сопутствующие работе технических средств систем информатизации и связи, распространяются в окружающее пространство. В зону действия этих излучений попадают токопроводящие элементы и конструкции, обладающие свойствами антенн. В таких случайных антеннах электромагнитное поле наводит ЭДС и ток опасного сигнала. Роль случайных антенн могут играть проводники технических средств, токоведущие элементы систем заземления, металлические корпуса аппаратуры, посторонние протяженные проводники (например, провода открытой телефонной или громкоговорящей связи, сигнализации). Токи опасных сигналов, наводимые электромагнитными полями, сопутствующими работе технических средств, распространяясь по токоведущим коммуникациям, создают реальные предпосылки утечки информации.

### Непосредственная индуктивная паразитная связь

Такая связь возникает через ближнее магнитное поле.

В цепи источника наводки (ИН) *A* (рис. 2.2) протекает переменный ток  $I_A = E_{ИН}/Z_A$ , где  $Z_A$  – полное сопротивление цепи *A*.

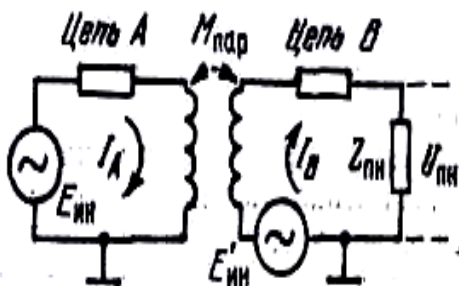


Рис. 2.2. Схема возникновения индуктивной паразитной связи

Эта цепь индуктивно связана с цепью ПН *B* паразитной взаимоиנדуктивностью  $M_{пар}$ . Ток  $I_A$  возбуждает в цепи *B* электродвижущую силу

$$E'_{ИН} = I_A \omega M_{пар} = E_{ИН} \omega M_{пар} / Z_A,$$

под действием которой в цепи *B* протекает ток

$$I_B = E'_{ИН} / Z_B = E_{ИН} \omega M_{пар} / Z_A Z_B,$$

где  $Z_B$  – полное сопротивление цели *B*, частью которого является входное сопротивление ПН  $Z_{ПН}$ . В результате на входе ПН получается напряжение

$$U_{ПН} = I_B Z_{ПН} = E_{ИН} \omega M_{пар} Z_{ПН} / Z_A Z_B,$$

откуда коэффициент индуктивной ПС

$$\beta_M = U_{ПН} / E_{ИН} = \omega M_{пар} Z_{ПН} / Z_A Z_B. \quad (2.1)$$

Таким образом, индуктивная ПС проявляется тем сильнее, чем выше частота, больше паразитная взаимоиנדуктивность, больше входное сопротивление ПН и чем меньше полные сопротивления связывающихся цепей.

## Сравнение различных видов паразитной связи

С помощью данных табл. 2.1 – 2.3 можно приближенно оценить степень влияния того или иного вида ПС. Допустим, что провода диаметром 1 мм, относящиеся к возможным ИН и ПН, проложены рядом, и на участке 200 мм расстояние между ними составляет 10 мм. Если ИН присоединен к корпусу шины диаметром 2 мм, к которой подключен ПН на расстоянии 50 мм от корпуса, то индуктивность равна 0,04 мкГ.

Взаимная индуктивность двух замкнутых контуров зависит от их взаимного расположения и конфигурации каждого контура. Если в оба контура входят участки двух параллельных объемных или печатных проводов, то изменение расстояния между ними может привести и к увеличению, и к уменьшению взаимной индуктивности. Это будет зависеть от изменения расположения и конфигурации контуров, а не от изменения, произведенного в указанном участке. В отдельной литературе даются формулы для расчета взаимной индуктивности прямых проводников. Использовать их нельзя и истинную величину индуктивной паразитной связи можно определить только измерением на макете.

Таблица 2.1

Параметры плоских медных проводников, нанесенных на одностороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Индуктивность, нГ:				
при длине 10 мм	9,6	8,4	7,0	5,6
при длине 100 мм	138	130	116	102

Таблица 2.2

Параметры плоских прямых проводников, нанесенных на двухстороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Индуктивность (нГ/см) при широком втором слое, являющемся обратным проводником, и толщине платы:				
0,5 мм	4,9	3,9	2,5	1,1
1 мм	6,3	5,3	3,9	2,5
2 мм	7,7	6,7	5,3	3,9

Таблица 2.3

Ориентировочные значения параметров медного прямого провода длиной 100 мм

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Сопротивление, мОм	35,6	8,9	2,2	0,55
Индуктивность, мкГ	0,145	0,12	0,10	0,08
Индуктивность (мкГ) провода, проходящего параллельно корпусу на расстоянии:				
10 мм	0,116	0,084	0,07	0,056
100 мм	0,142	0,110	0,096	0,08

### Подавление паразитной индуктивной связи

Для уменьшения взаимоиנדуктивности  $M_{\text{пар}}$  можно применять различные способы:

- изменить расположение связывающих цепей при максимальном расстоянии одной от другой;
- подобрать ориентацию трансформаторов, дросселей и катушек так, чтобы их оси были перпендикулярны, использовать элементы с малым рассеиванием магнитного потока (тороидальные и броневые сердечники из магнитодиэлектриков и ферритов, материалы с высокой магнитной проницаемостью);
- увеличить полное сопротивление связывающихся цепей.

При недостаточности этих мер производится экранирование магнитного поля.

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают причины образования индуктивной паразитной связи.
2. По заданию преподавателя определяют величину паразитной индукции для конкретных значений, указанных в табл. 2.1. Длина проводников варьируется от 50 до 100 мм.
3. По заданию преподавателя определяют величину паразитной индукции для конкретных значений, указанных в табл. 2.2. Длина проводников варьируется от 50 до 100 мм.
4. По заданию преподавателя определяют величину паразитной индукции для конкретных значений, указанных в табл. 2.3. Длина проводов варьируется от 5 до 10 м.
5. По заданию преподавателя для двух фиксированных частот (например 1 кГц и 1 МГц) и сопротивления приемника наводки (например 1 и 2 кОм) для каждого значения паразитной индукции рассчитывают коэффициент паразитной индуктивной связи.

6. Анализируют полученные результаты (указывают уровень наведенного паразитного сигнала) и делают выводы о снижении влияния индуктивной паразитной связи.

7. Расчеты дополняются эскизами расположения проводников с указанием размеров.

## Практическое занятие №3

### ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ подавления паразитной электрической связи и экранирования электрических полей.

#### Теоретические сведения

##### Экранирование

Подавление наводок в большинстве случаев сводится к устранению или ослаблению ПС между ИН и ПН путем экранирования.

Экранированием называется локализация электромагнитной энергии в определенном пространстве за счет ограничения распространения ее всеми возможными способами.

Из этого определения следует, что в понятие экрана входят как детали механической конструкции, так и электротехнические детали фильтрующих цепей и развязывающих ячеек, так как только их совместное действие дает необходимый результат.

В предыдущем практическом занятии было рассмотрено, что ПС между разнесенными ИН и ПН получается в основном по проводам. В таких случаях достаточно включить в них одну или несколько развязывающих ячеек (РЯ), чтобы получить удовлетворительное экранирование без механических деталей. Если же в хорошо заэкранированное перегородками и корпусами пространство ввести неотфильтрованный провод, то можно полностью нарушить экранирование.

##### Эффективность экранирования

Эффективностью экранирования ( $\mathcal{E}$ ) называется отношение напряжений и токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемом пространстве при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = U/U' = I/I' = E/E'. \quad (3.1)$$

В технике проводной связи эту величину оценивают в неперах (Нп):  $B = \ln \mathcal{E} = 0,115 A$ , а в радиотехнике – в децибелах (дБ):  $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8,7 B$ .

##### Подавление паразитной емкостной связи

Чтобы уменьшить паразитную емкость  $C_{\text{пар}}$ , изменяют расположение тел  $A$  и  $B$  отдавая их на максимально возможное расстояние друг от друга; изменяют ориентацию; используют в конструкции миниатюрные радиоэлементы. При недостаточности всех этих мер между элементами устанавливается экран (рис. 3.1), служащий для экранирования электрического поля (постоянного и переменного). Иногда этот вид экранирования называют электростатическим. Экран вводит в цепь связи тел  $A$  и  $B$  дополни-



тельный делитель, состоящий из емкостей  $C_1$  и  $C_3$ , который определяет напряжение на нем. Напряжение на теле  $B$  зависит от напряжения на экране и значения емкостей  $C_2$  и  $C_{св}$ . Если  $C_1 > C_3$ , то первый делитель почти не действует, напряжение на экране почти равно напряжению на теле  $A$ , напряжение на теле  $B$  и на ПН ( $U_{ПН}$ ) после установки экрана возрастает, а экран оказывается вредным. С увеличением емкости  $C_3$  напряжение  $U_{ПН}$  падает и при  $C_3 = \infty$  (что равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом) делается равным нулю, если не учитывать остаточную паразитную емкость  $C'_{пар}$  между телами (см. рис. 3.1, б). В действительности напряжение на теле  $B$  не равно нулю и может быть определено из уравнения

$$U'_{ПН} = E_{ин} C'_{пар} / C_B.$$

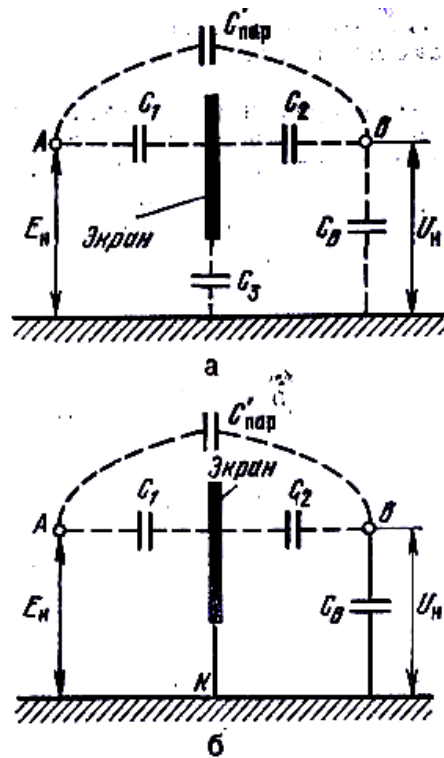


Рис. 3.1. Незаземленный (а) и заземленный (б) экраны

Для постоянного и переменного электрических полей

$$\mathcal{E} = C_{пар} / C'_{пар}.$$

Таким образом, применение экрана, соединенного с корпусом прибора, сводится к уменьшению  $C_{пар}$  путем создания короткого замыкания на корпус для большей части паразитной емкости, имеющейся между экранируемыми друг от друга телами.

Между точками  $AK$  (см. рис. 3.1, б) протекает ток  $I$ , величина которого определяется большим сопротивлением паразитной емкости  $C_1$ . Этот небольшой ток создает незначительный магнитный поток, которым пренебрегают. Также пренебрегают падением напряжения, получающимся на большой поверхности экрана. Важно, чтобы соединение экрана с корпусом было действи-

тельно коротким. Здесь соединительные проводники недопустимы. Несколько сантиметров провода могут резко ухудшить экранирование.

Эффективность экранирования электрического поля не зависит от толщины экрана. Применимы даже электропроводящие краски. Узкие щели и отверстия в экране не ухудшают экранирования электрического поля, если они малы по сравнению с длиной волны.

Металлический лист (крышка), прикрывающий экранируемые тела, может действовать по-разному. Если лист не соединен с корпусом, то  $C_3$  мала, последовательное соединение  $C_1$  и  $C_2$  значительно больше  $C_{\text{пар}}$ , и такая крышка дает увеличение ПС. Если лист замкнуть на корпус, то  $C_1$  и  $C_2$  не будут связывать тела  $A$  и  $B$ , останется только  $C'_{\text{пар}}$ , которая меньше  $C_{\text{пар}}$ . Отсюда следует, что присоединенная к корпусу прибора крышка улучшит эффективность экранирования, несмотря на то что она расположена не между экранируемыми телами. Экранирование может быть довольно эффективным, если лист проходит вблизи от экранируемых точек. В конструкции крышки важно, чтобы надежный контакт с корпусом не нарушался при производстве и эксплуатации. Крышка, плохо соединенная с корпусом, может оказаться причиной отказа в работе устройства.

### Экранирование электрических полей

Функциональные узлы и элементы технических средств обработки информации, в которых имеют место большие напряжения и протекают малые токи, создают в ближней зоне электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей.

Связь через ближнее электрическое поле между источником и рецептором наводки рассматривается как связь через малую паразитную емкость  $C_{\text{св}}$ . На рис. 3.2, а показано влияние элемента 1 на элемент 2 из-за наличия взаимной емкости связи  $C_{\text{св}}$ , а на рис. 3.2, б – эквивалентная рассматриваемому случаю схема.

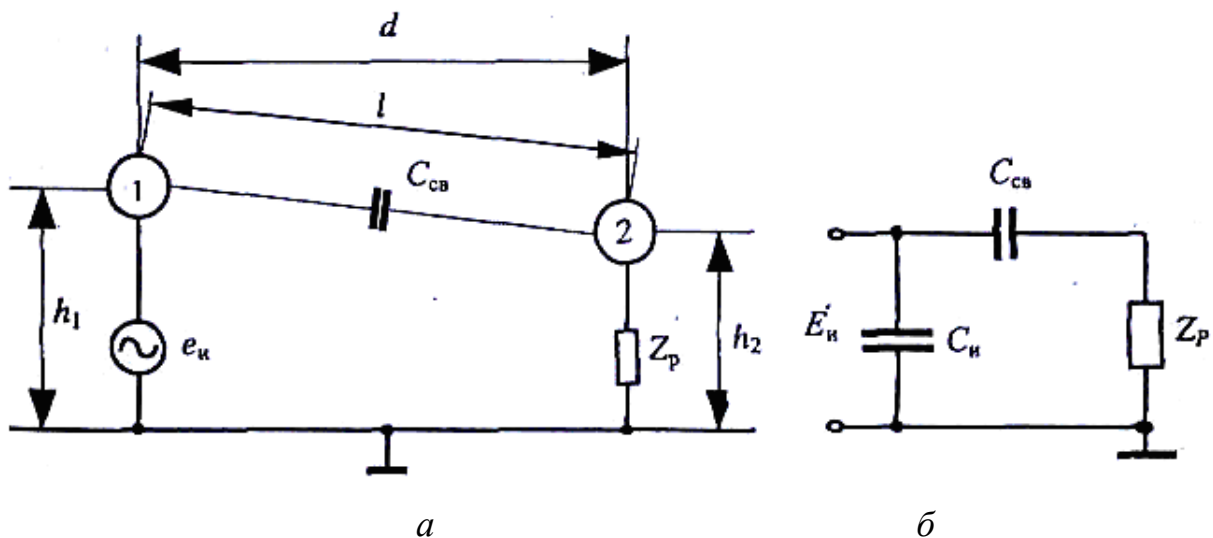


Рис. 3.2. Схема образования емкости связи (а) и эквивалентная схема (б)

Здесь  $Z_p$  – комплексное сопротивление рецептора наводки относительно корпуса, в общем случае состоящее из параллельно включенных входного сопротивления  $Z_{вх}$  и емкости  $C_p$  относительно корпуса;  $C_{и}$  – емкость источника наводки относительно корпуса.

Комплексная амплитуда напряжения наводки в цепи рецептора

$$\dot{U}_p = \frac{\dot{E}_{и} Z_p}{\frac{1}{j\omega C_{св}} + Z_p}, \quad (3.)$$

где  $\dot{E}_{и}$  – комплексная амплитуда ЭДС  $e_{и}$  в цепи источника наводки;

$\omega$  – частота напряжения источника наводки;  $X_{св} = \frac{1}{j\omega C_{св}}$  – емкостное со-

противление связи.

Из (3.2) следует, что наведенное в цепи рецептора напряжение будет тем больше, чем меньше емкостное сопротивление  $X_{св}$  (т. е. чем больше емкость связи  $C_{св}$ ), чем больше сопротивление  $Z_p$ , ЭДС источника наводки и частота  $\omega$  его сигнала.

На практике выполняется следующее условие: амплитуда напряжения наводки в цепи рецептора равна  $|Z_p| \ll \frac{1}{\omega C_{св}}$ , поэтому из формулы (3.2) следует,

что

$$\dot{U}_p = j\omega C_{св} Z_p \dot{E}_{и}. \quad (3.3)$$

В ряде случаев полное сопротивление рецептора наводки относительно корпуса бывает число емкостным, т. е.

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_p},$$

где  $C_p$  – емкость рецептора наводки относительно корпуса.

Тогда комплексная амплитуда наведенного в цепи рецептора напряжения

$$\dot{U}_p = \frac{C_{св}}{C_p + C_{св}} \dot{E}_{и}. \quad (3.4)$$

При выполнении условия  $C_p \ll C_{св}$  напряжения наводки в цепи рецептора определяется выражением

$$\dot{U}_p = \frac{C_{св}}{C_p} \dot{E}_{и}. \quad (3.5)$$

Для широко распространенного в практике конструирования ТСОИ случая параллельных проводников шириной  $b$ , длиной  $l$ , находящихся на расстоянии  $a$  друг от друга, емкость связи определяется по формуле

$$C_{св} = \epsilon\epsilon_0 l [1 + 0,5 \lg(b/a)]. \quad (3.6)$$

Для ослабления влияния электрической связи в аппаратуре следует:

1) максимально разносить цепи приемника и источника наводки, что снижает  $C_{св}$ ;

2) компоновать цепи приемника и источника наводки так, чтобы емкость связи  $C_{св}$  между ними была минимальной (например, располагать провода линий источника и приемника наводки под углом, близким к  $90^\circ$ );

3) уменьшать размеры цепей источника и приемника наводки.

Если возможность применения указанных мер при проектировании ТСОИ и систем информатизации ограничена, то для обеспечения требуемого ослабления воздействия источника наводки необходимо использовать электрическое экранирование.

Суть электрического экранирования состоит в следующем. При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда начинают двигаться упорядоченно: положительные – в направлении вектора  $E$ , отрицательные – в противоположном направлении. В результате у концов проводника возникают индуцированные заряды противоположного знака (рис. 3.3).

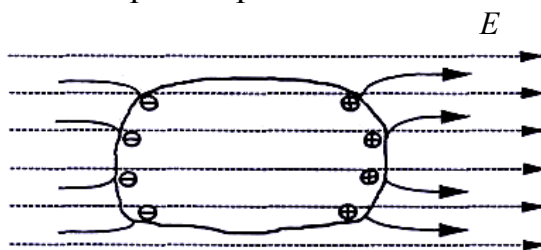


Рис. 3.3. Распределение индуцированных зарядов в проводнике

Поле, создаваемое этими зарядами, направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накопление зарядов у концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия равенства нулю напряженности поля внутри проводника.

Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на индуцированных на поверхности проводника отрицательных зарядах и вновь начинаются на положительных.

Индуцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее также равно нулю.

Явление электростатической индукции используется для осуществления электростатического экранирования. Если источник электростатического поля защищен металлическим экраном, то в результате индукции на внутренней и внешней поверхностях экрана произойдет разделение электрических зарядов (рис. 3.4, а).

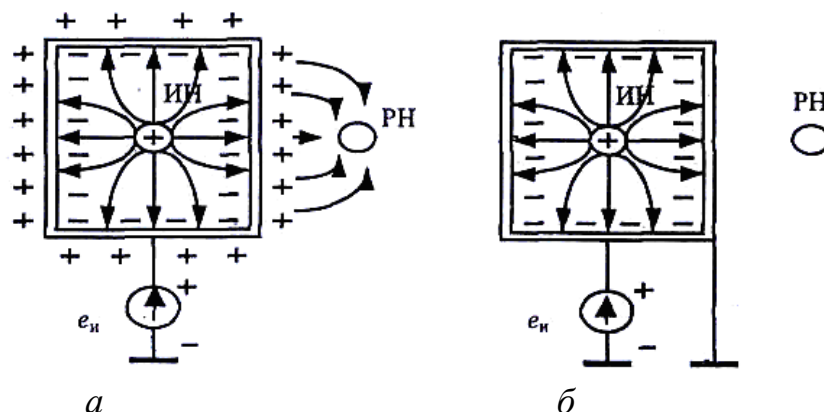


Рис. 3.4. Электрические незаземленный (а) и заземленный (б) экраны

При заземлении экрана заряд, индуцированный на внешней поверхности экрана, нейтрализуется, и поле вне экрана становится равным нулю (рис. 3.4, б).

Эффективность экранирования электрического поля

$$A = 20 \lg \frac{U_p}{U_{p.з}} = 20 \lg \frac{C_{св}}{C'_{св}},$$

где  $U_p$ ,  $U_{p.з}$  – напряжения, наводимые в цепи рецептора наводки при отсутствии и наличии заземленного экрана.

Эффективность экранирования определяется в основном отношением емкостей связи между источником и рецептором наводки до и после установки заземленного экрана. Поэтому любые действия, приводящие к снижению  $C_{св}$ , увеличивают эффективность экранирования.

Экранирующее действие металлического экрана существенно зависит от качества соединения экрана с корпусом прибора и частей экрана друг с другом.

Основные требования, которые предъявляются к электрическим экранам, можно сформулировать следующим образом:

1) конструкция экрана должна выбираться такой, чтобы силовые линии электрического поля замыкались на стенки экрана, не выходя за его пределы;

2) в области низких частот эффективность электростатического экранирования практически определяется качеством электрического контакта металлического экрана с корпусом устройства и мало зависит от материала экрана и его толщины;

3) в области высоких частот эффективность экрана, работающего в электромагнитном режиме, определяется его толщиной, проводимостью и магнитной проницаемостью.

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают физические основы экранирования магнитного поля.
2. Изображают эскиз экрана, указывают распределение линий напряженности магнитного поля и размеры экраны, определяющие его эффективность.

3. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для незаземленного и заземленного материалов экрана, параметры которых приведены в табл. 4.1.

4. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования электрического поля для данных видов экрана.

5. Анализируют рассчитанные значения эффективности экранирования и делают выводы о ее повышении.

## Практическое занятие №4

### ЭКРАНИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ подавления паразитной индуктивной связи и экранирования постоянных и низкочастотных магнитных полей.

#### Теоретические сведения

##### Экранирование постоянного и медленно изменяющегося магнитных полей

Этот вид экранирования часто называют магнитостатическим. Экраны изготавливают из ферромагнитных материалов (пермаллоя или стали) с большой относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r$ . Линии магнитной индукции проходят в основном по стенкам такого экрана, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования магнитных полей зависит от магнитной проницаемости экрана и сопротивления магнитопровода, которое будет тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, идущих поперек направления линий магнитной индукции.

На рис. 4.1 поясняется сущность процесса экранирования магнитостатического поля магнитным экраном (см. рис. 4.1, а), а также приведены эквивалентные схемы для расчета эффективности экранирования: при отсутствии экрана (см. рис. 4.1, б) и с применением экрана (см. рис. 4.1, в). На рисунке введены следующие обозначения:

$R_{b1}$  и  $R_3$  – магнитное сопротивление области пространства, имеющей площадь поперечного сечения  $S_1$ , при отсутствии и наличии экрана соответственно;

$R_{b2}$  – магнитное сопротивление экранируемой области пространства, имеющей площадь поперечного сечения  $S_2$ .

Эффективность экранирования для экрана, изображенного на рис. 4.1, определяется выражением

$$A = 20 \lg \left( \frac{\mu S_1 + S_2}{S} \right),$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана;

$$S = S_1 + S_2.$$

Если экран выполнен из немагнитного материала с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 1$  (медь, латунь, алюминий), то он не оказывает на магнитное поле источника наводки никакого влияния, и эффективность экранирования будет равна нулю.

Если же экран изготовлен из ферромагнитного материала (пермаллой, сталь) с большим значением относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , то магнитный поток замыкается в основном на стенки экрана, имеющего меньшее магнитное сопротивление по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного пространства, занятого экраном.

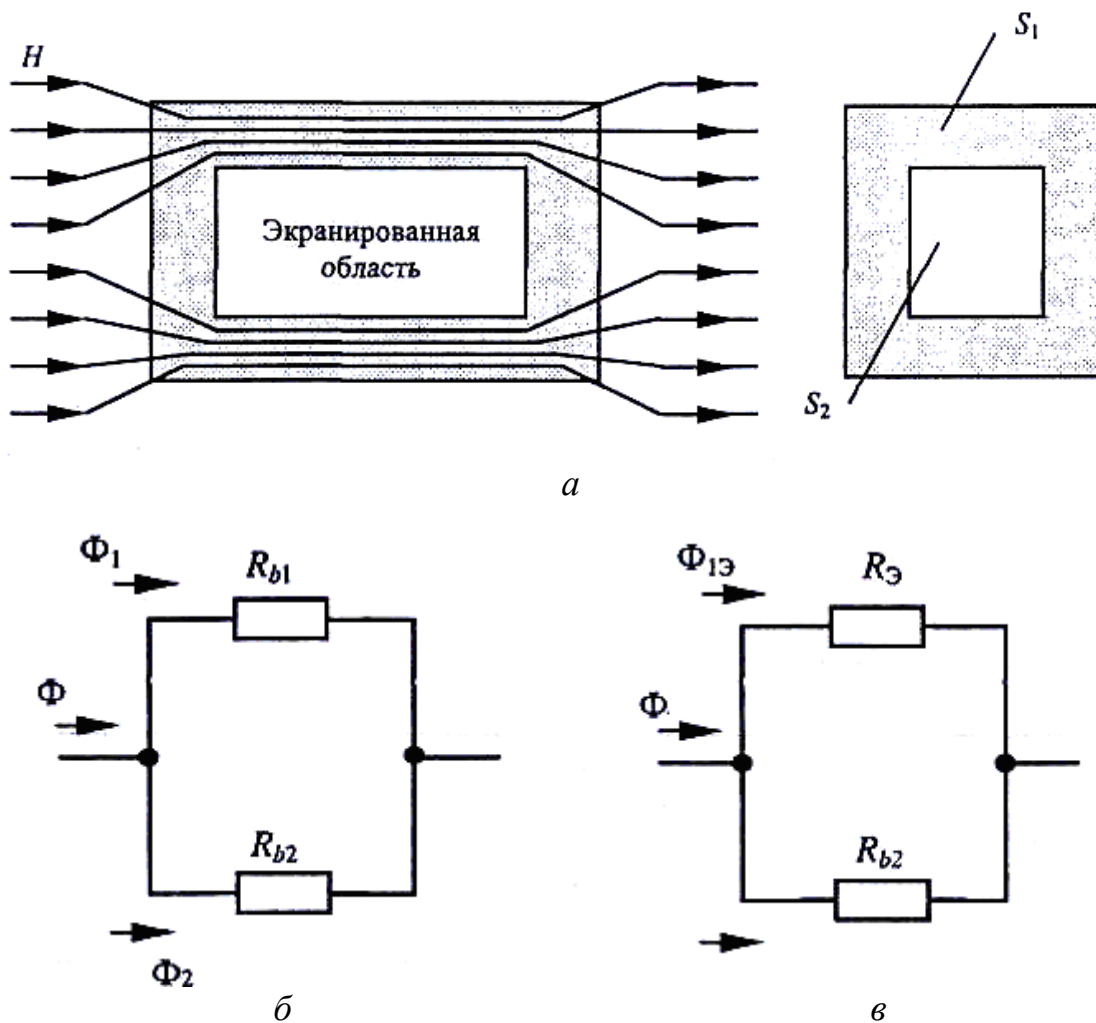


Рис. 4.1. Распространение магнитного поля (а) и эквивалентные схемы экрана (б, в)

Если  $S_1 \ll S_2$ ,

$$A \approx 20 \lg \left( \frac{\mu S_1 + S_2}{S_2} \right) = 20 \lg \left( 1 + \frac{\mu S_1}{S_2} \right). \quad (4.1)$$

Магнитоэкранирование используется при необходимости подавить наводки на низких частотах от 0 до 3...10 кГц.

Основные требования, предъявляемые к магнитоэкранным экранам, можно сформулировать следующим образом:

1. Магнитная проницаемость  $\mu_a$  материала экрана должна быть высокой.
2. Увеличение толщины стенок экрана приводит к повышению эффективности экранирования.
3. Заземление экрана не влияет на эффективность магнитоэкранирования.

4. Экран такой конструкции используется редко, только при необходимости подавить наводку на частотах 0...1 кГц. В этом диапазоне эффективность экрана от частоты не зависит. Ее можно приближенно определить по уравнению



$$\mathcal{E} = 1 + \mu_r \delta_{\text{экр}} / D, \quad (4.2)$$

где  $\delta_{\text{экр}}$  – толщина стенок экрана;

$D$  – диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий к длине стенки кубического экрана.

Таблица 4.1

Электрофизические параметры некоторых металлов

Параметры	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	0,0175	0,06	0,03	0,1		0,65
Удельная проводимость $\sigma$ , см·см <sup>3</sup>	$57 \cdot 10^4$	$16,6 \cdot 10^4$	$33 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^4$		$1,54 \cdot 10^4$
Относительная магнитная проницаемость, $\mu_r$	1	1	1	50	100	12 000

На указанных частотах экран получается громоздким и дорогим. Получить сколько-нибудь удовлетворительную эффективность удастся только при применении специальных материалов с высоким значением  $\mu_r$ .

**Пример 4.1.** Определим эффективность подавления наводки на частотах 0...1 кГц экраном кубической формы с длиной ребра  $D = 100$  мм; материал – сталь толщиной  $\delta_{\text{экр}} = 0,8$  мм,  $\mu_r = 100$ . После подстановки в (4.2) получим:  $\mathcal{E} = 1 + 100 \cdot 0,8 / 100 = 1,8$  или  $B = \ln 1,8 = 0,59$  Нп;  $A = 20 \lg 1,8 = 5,1$  дБ.

Увеличением толщины стального экрана нельзя добиться значительного повышения его эффективности. Так, при  $\delta_{\text{экр}} = 2$  мм (что технологически крайне неудобно)  $\mathcal{E} = 3$ ;  $B = 1,1$  Нп и  $A = 9,6$  дБ, т. е. значение  $\mathcal{E}$  возрастает всего на 4,5 дБ. Если же взять пермаллой ( $\mu_r = 5000$ ) той же толщины (0,8 мм), то  $\mathcal{E} = 41$ ,  $B = 3,7$  Нп;  $A = 32$  дБ.

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают физические основы экранирования низкочастотного магнитного поля.
2. Изображают эскиз экрана, указывают распределение линий напряженности магнитного поля и размеры экраны, определяющие его эффективность.

3. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана, параметры которых приведены в табл. 4.1.

4. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для различных значений толщины стенок и диаметра экрана.

5. Анализируют рассчитанные значения эффективности экранирования и делают выводы о ее повышении.

## Практическое занятие №5

### ЭКРАНИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ подавления паразитной индуктивной связи и экранирования высокочастотного магнитного поля.

#### Теоретические сведения

##### Экранирование высокочастотного магнитного поля

В конструкции электромагнитных экранов применяют немагнитные и ферромагнитные металлы. Вихревые токи, наведенные полем ИН в теле экрана, вытесняют внешнее поле из пространства, занятого экраном (рис. 5.1).

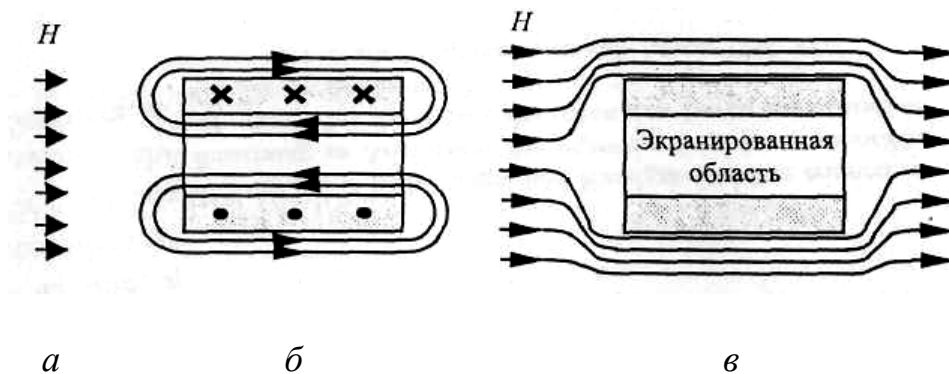


Рис. 5.1. Схема действия высокочастотного экрана: поле ИН (а), поле цилиндра (б), суммарное поле (в)

Экранирование методом вытеснения (компенсации) магнитного поля полем вихревых токов в экране основано на использовании явления электромагнитной индукции. Переменное магнитное поле, пронизывая экран, индуцирует в нем ЭДС, которая в свою очередь вызывает вихревые токи в экране. Эти токи создают вторичное магнитное поле, направленное в защищаемой экраном области навстречу воздействию на экран полю.

Результирующее магнитное поле внутри экрана оказывается ослабленным, а за пределами экрана усиленным. Таким образом, происходит вытеснение поля из защищаемой области во внешнюю область пространства, а следовательно, и экранирование рабочего объема экрана от внешнего магнитного поля.

С увеличением частоты магнитного поля распределение вихревых токов по сечению материала экрана становится все более неравномерным, т. е. проявляется поверхностный эффект, при котором происходит сосредоточение вихревых токов в поверхностных слоях экрана и ослабление переменного магнитного поля при проникновении его в глубину материала экрана. Чем выше частота магнитного поля, тем меньше глубина проникновения. Следовательно, экранирование магнитного поля обусловлено, во-первых, компенсацией этого поля магнитным полем вихревых токов, и, во-вторых, ослаблением магнитно-

го поля при проникновении в глубину материала стенок экрана. До тех пор пока толщина стенок экрана меньше глубины проникновения (для низких частот), основную роль играет компенсация поля. С повышением частоты, когда толщина стенок экрана становится больше глубины проникновения, решающим может оказаться ослабление поля при проникновении его в толщу стенок экрана. Так как с ростом частоты магнитного поля глубина проникновения уменьшается, то уменьшается и магнитопроводимость экрана, которая зависит от габаритных размеров и магнитной проницаемости материала экрана. В этих условиях из-за существенного уменьшения эквивалентной толщины стенок экрана явление шунтирования магнитного поля не проявляется. Поэтому для обеспечения экранирования на высоких частотах в качестве материала экранов часто применяют немагнитные материалы.

Определим эффективность экранирования немагнитного экрана для диапазона частот, в котором поверхностный эффект можно не учитывать, считая, что толщина экрана много меньше глубины проникновения, т. е.  $d \ll \delta$ .

С увеличением частоты магнитного поля источника наводки  $d > \delta$  необходимо учитывать поверхностный эффект. В этом случае экран можно представить в виде ряда последовательно включенных экранов, каждый из которых образует короткозамкнутый виток, связанный с остаточным магнитным потоком соседнего витка. В результате величина остаточного взаимосвязанного магнитного потока в экране уменьшается от слоя к слою, что позволяет рассматривать отдельные слои экрана как Г-образные звенья фильтров. Таким образом, эффективность экранирования высокочастотного магнитного поля определяется потерями за счет поглощения и отражения или компенсации полем вихревых токов в экране.

Из-за поверхностного эффекта плотность тока и напряженность магнитного поля падает по экспоненциальному закону по мере углубления в металл:

$$\frac{\text{Плотность тока на глубине } x}{\text{Плотность тока на поверхности}} = e^{-\frac{x}{\delta}},$$

где  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$  – показатель уменьшения, доля в тока, называемый эквивалентной глубиной проникновения (табл. 5.1).

На глубине  $x = \delta$  плотность тока и напряженность магнитного поля падает в  $e$  раз, т. е. до величины  $1/2,72 = 0,37$  от плотности и напряженности на поверхности.

Экранирующее действие вихревых токов определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана. На высоких частотах при относительно большой толщине материала экрана  $\delta_{\text{экр}} > \delta$  действуют оба фактора, и эффективность экрана можно определить по приближенному уравнению

$$\mathcal{E} \approx e^{\delta_{\text{экр}}/\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2,8t\mu\delta} \right). \quad (5.1)$$

Таблица 5.1

ЭГП ( $\delta$ ) для различных экранирующих материалов, мм

Частота $\nu$ , Гц	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
				$\mu_r = 50$	$\mu_r = 100$	
$10^2$	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
$10^3$	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
$10^4$	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
$10^5$	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
$10^6$	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
$10^7$	0,2100	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
$10^8$	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—

На низких частотах, когда  $\delta_{\text{экр}} < \delta$ , поверхностный эффект незначителен, действует почти только первый фактор, и эффективность рассчитывают по уравнению

$$\mathcal{E} \approx \sqrt{1 + \left( \frac{\omega \mu_0 \sigma D \delta_{\text{экр}}}{2m} \right)^2}. \quad (5.2)$$

В уравнениях (5.1) и (5.2) приняты следующие обозначения:

$\delta_{\text{экр}}$  – толщина стенок экрана, см;

$D$  – ширина прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического, см;

$m$  – коэффициент формы экрана, для прямоугольного  $m = 1$ , для цилиндрического  $m = 2$  и для сферического  $m = 3$ ;

$\mu = \mu_0 \mu_r$  – магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$  Г·см<sup>-1</sup> – магнитная постоянная;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;

$\omega = 2\pi\nu$  – угловая частота;

$\nu$  – частота, Гц;

$\sigma$  – проводимость, См·см<sup>3</sup>.

Введение в формулы (5.1) и (5.2) множителя  $m$  позволяет использовать их также для расчета эффективности плоских и сферических экранов. Для этого при расчете эффективности плоского экрана следует заменить радиус экрана половиной расстояния между стенками экрана  $a/2$  и положить  $m = 1$ , для цилиндрического экрана принять  $m = 2$ . При изготовлении экрана из немагнитного металла ( $\mu = 1$ ) экранирующий эффект на высоких частотах определяется проводимостью материала и частотой магнитного поля источника наводки. Если экран выполнен из магнитного материала, то при прочих равных условиях магнитным полем источника наводки в нем наводится большая ЭДС из-за большей концентрации магнитного потока. Это приводит к увеличению вихревых токов в экране

при одинаковых проводимостях материалов, к большим потерям на поглощение и, следовательно, к лучшему экранированию.

**Пример 5.1.** Определить эффективность медного цилиндрического экрана на ( $\delta_{\text{экp}} = 0,8$  мм,  $D = 80$  мм) на частоте 0,1 МГц.

По табл. 5.1 находим ЭГП  $\delta = 0,21$  мм; так как  $\delta_{\text{экp}}/\delta = 0,8/0,21 = 3,8$ , то можно пользоваться формулой для случая  $\delta_{\text{экp}} > \delta$ . После подстановки получим

$$\mathcal{E} = e^{3,8} \left( 0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 0,21} \right) = 44,7 \cdot 68,5 = 3063,$$

$$B = 8 \text{ Нп}, \quad A = 69,7 \text{ дБ}.$$

**Пример 5.2.** Определить, как изменится значение  $\mathcal{E}$ , если экран из предыдущего примера выполнить из стали с  $\mu_r = 100$ .

По табл. 5.1 находим  $\delta = 0,049$  мм. Отношение  $\delta_{\text{экp}}/\delta = 0,8/0,049 = 16,3$ . Подставляя в (5.1), получаем

$$\mathcal{E} = e^{16,3} \left( 0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,049} \right) = 1,2 \cdot 10^7 \cdot 3,4 = 4,1 \cdot 10^7,$$

$$B = 17,5 \text{ Нп}, \quad A = 152 \text{ дБ}.$$

**Пример 5.3.** Определить экранирующее действие вихревых токов на частотах 0,1 и 1 кГц, возникающих в цилиндрическом медном экране:  $\delta_{\text{экp}} = 0,8$  мм,  $D = 80$  мм.

По табл. 5.1 имеем  $\delta_{0,1} = 6,7$  мм;  $\delta_1 = 2,1$  мм. Для обеих частот  $\delta_{\text{экp}} < \delta$ , после подстановки получим для частоты 0,1 кГц:

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,008,$$

$$B = 0,21 \text{ Нп}, \quad A = 1,8 \text{ дБ}.$$

Для частоты 1 кГц

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 57 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 7,27,$$

$$B = 2,0 \text{ Нп}, \quad A = 17,4 \text{ дБ}.$$

**Пример 5.4.** Найти, как изменится значение  $\mathcal{E}$  при замене медного экрана в предыдущем примере стальным с  $\mu_r = 100$ .

По табл. 5.1 имеем  $\delta_{0,1} = 1,55$  мм;  $\delta_1 = 0,49$  мм. Для обеих частот  $\delta_1 < \delta_{\text{экp}}$  на частоте 0,1 кГц

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left( \frac{2\pi \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^4 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08}{2 \cdot 2} \right)^2} = 1,008.$$

На частоте 1 кГц

$$\mathcal{E} = e^{0,8/0,49} \left( 0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,49} \right) = 5,1 \cdot 0,79 = 4,05,$$

$$B = 1,4 \text{ Нп}, \quad A = 12,2 \text{ дБ}.$$

Последние два примера подтверждают, что на частотах 0,1...1 кГц экранирование вихревыми токами действует слабо, и магнитное поле можно ослабить только шунтированием его толстым ферромагнитным материалом с большим  $\mu_r$ . С повышением частоты увеличивается вытеснение магнитного поля из толщи ферромагнитного материала вследствие поверхностного эффекта, уменьшается действующая толщина экрана и эффективность экранирования шунтированием поля падает, а вытеснением поля растет. В диапазоне звуковых частот 0,1...1,0 кГц экранирование магнитного поля является труднейшей задачей и к нему прибегают крайне редко. Предпочитают пользоваться средствами подавления индуктивных ПС, отказываются от использования трансформаторов, что довольно просто достигается в аппаратуре на транзисторах и ИС. Только в редких случаях применяют многослойные экраны из различных материалов.

На частотах выше 10 кГц всегда можно по табл. 5.1 подобрать материал и его толщину так, чтобы выполнялось неравенство  $\delta_{\text{экр}} < \delta$ . Это позволяет пользоваться формулой, из которой следует, что ориентировочная эффективность экрана будет  $\mathcal{E}_{\text{min}} = e^{\delta_{\text{экр}}/\delta}$ , откуда  $B_{\text{min}} = \delta_{\text{экр}}/\delta$ .

**Пример 5.5.** Какой толщины должен быть алюминиевый экран, чтобы получить  $\mathcal{E} \geq 100$  дБ на частоте 1 МГц?

Расчет:

1.  $B_{\text{min}} = 0,115 \cdot 100 = 11,5$  Нп.

2. Из табл. 5.1 находим:  $\delta = 0,088$ ,  $\delta_{\text{экр}} = B_{\text{min}} \delta = 11,5 \cdot 0,088 = 1$  мм.

На частотах свыше 1 МГц экран из любого металла толщиной 0,5...1,5 мм действует весьма эффективно. При выборе толщины и материала экрана в первую очередь следует учитывать не электрические свойства металла, а его механическую прочность, вес, жесткость, стойкость против коррозии, удобство стыковки отдельных деталей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобство пайки, сварки и прочее.

По данным табл. 5.1 видно также, что для частот выше 10 МГц хорошим экраном является медная пленка толщиной около 0,1 мм. Поэтому на этих частотах в конструкции экранов допустимо применение фольгированного гетинакса или другого изоляционного материала с нанесенным на него медным покрытием. Можно также использовать электропроводящие краски и пленки.

Значения эффективной глубины проникновения для стали с относительной магнитной проницаемостью  $\mu_r = 50$  показывают, что и на ВЧ эффектив-

ность стального экрана больше, чем немагнитного. Однако экраны из стали могут вносить значительные потери в экранируемые цепи вследствие большого значения  $\rho$  и явления гистерезиса. Поэтому их применяют только в случаях, когда с вносимыми потерями можно не считаться.

При правильно выбранных размерах и материале магнитного экрана рассчитанное значение  $\mathcal{E}$  почти всегда оказывается больше необходимого. При этом действительная эффективность зависит исключительно от конструкции и качества выполнения экрана. Коэффициент индуктивной ПС пропорционален  $M_{\text{пар}}$ . Очевидно, что подобно подавлению емкостной ПС после экранирования магнитного поля остаточная индуктивная ПС пропорциональна  $M'_{\text{пар}}$ .

Глубина проникновения для различных металлов в области высоких частот достаточно мала. Следовательно, экран из любого металла сравнительно небольшой толщины действует достаточно эффективно. Поэтому на практике при выборе толщины и материала экрана определяющими могут оказаться требования жесткости, устойчивости к механическим воздействиям, стойкости против коррозии, технологичности конструкции и т. д.

Таким образом, основные требования, которые предъявляются к экранам, действующим по принципу вытеснения магнитного поля полем вихревых токов в экране, заключаются в следующем:

1. Толщина экрана должна выбираться намного больше, чем глубина проникновения. Этому условию могут удовлетворять как немагнитные, так и магнитные материалы. Однако применение последних возможно в случае, если вносимыми ими в экранируемые узлы радиоаппаратуры потерями можно пренебречь.

2. Снижение электрического сопротивления материала экрана вихревым токам повышает его эффективность. Поэтому чаще всего высокочастотные экраны изготавливают из алюминия, меди и латуни.

3. Стыки, разрезы и швы должны располагаться в направлении вихревых токов в экране.

4. Заземление экрана, работающего за счет образования вихревых токов, не влияет на эффективность магнитного экранирования.

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают физические основы экранирования высокочастотного магнитного поля.

2. Изображают эскиз экрана, указывают распределение линий напряженности магнитного поля и размеры экраны, определяющие его эффективность.

3. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана, параметры которых приведены в табл. 5.1 на фиксированной частоте.



4. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана при различных значений толщины стенки на фиксированной частоте.

5. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана при постоянной толщине стенки экрана в диапазоне частот  $10^2 \dots 10^6$  Гц.

6. Анализируют рассчитанные значения эффективности экранирования и делают рекомендации по ее повышению.

## Практическое занятие №6 ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЦЕПИ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ фильтрации электрических сигналов и оценки ее эффективности.

### Теоретические сведения

#### Фильтрующие (развязывающие) цепи

В целях фильтрации в технических средствах систем информатизации и связи широко используют различные фильтры (нижних и верхних частот, полосовые, заграждающие и т. д.). Основное назначение фильтра – пропускать без значительного ослабления сигналы с частотами, лежащими в рабочей полосе частот, и подавлять (ослаблять) сигналы с частотами, лежащими за пределами этой полосы.

В фильтруемый провод включают последовательно ( $Z_1, Z_3, Z_5, \dots$ ) и параллельно ( $Z_2, Z_4, Z_6, \dots$ ) сопротивления (рис. 6.1).

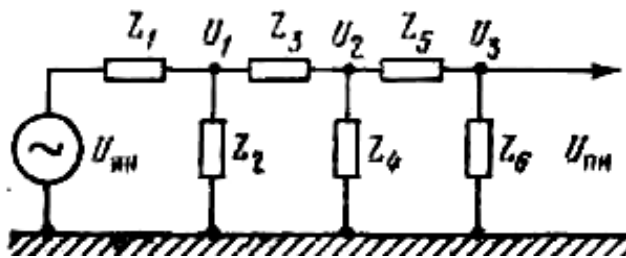


Рис. 6.1. Общая схема фильтрующей цепи

Величина последовательных сопротивлений для фильтруемых частот выбирается большой, а для параллельных – малой. При этом фильтрующую цепь можно рассматривать как серию последовательно включенных делителей напряжения. Если напряжение ИН равно  $U_{ин}$ , то в результате действия первого делителя, состоящего из сопротивлений  $Z_1, Z_2$ , напряжение снизится до величины  $U_1 = U_{ин} Z_1 / Z_2$ , после второго делителя напряжение будет равно  $U_2 = U_{ин} Z_2 Z_4 / Z_1 Z_3$  и т. д. К последнему делителю подключен ПН, и напряжение на его входе будет равно  $U_{пн} = U_{ин} Z_{2,4,6} / Z_{1,3,5}$ .

Под эффективностью фильтрации будем понимать отношение

$$\text{ЭФ} = U_{ин} / U_{пн} = Z_{1,3,5} / Z_{2,4,6} \quad (6.1)$$

показывающее, во сколько раз изменится напряжение на входе ПН от включения фильтра. Величина ЭФ часто выражается в неперах или децибелах.

Полезное (не паразитное) действие фильтруемого провода заключается в передаче постоянных напряжений питания, переменных напряжений силовой сети, импульсных или медленно изменяющихся напряжений управления и др.

Одновременно с необходимым подавлением наводки фильтрующая цепь должна передавать полезные напряжения без значительных потерь и искажений.

В качестве последовательных сопротивлений в фильтрующей цепи применяются непроволочные постоянные резисторы или дроссели. Резисторы удобны тем, что величина их сопротивления практически не зависит от частоты. Кроме того, резисторы имеют небольшие размеры и дешевы. Применение резисторов ограничивается падением на них напряжений не только частот, подлежащих фильтрации, но и полезных. Поэтому резисторы применяются только при малых токах и высоких напряжениях, передаваемых по фильтрующему проводу, когда небольшая потеря напряжения и мощности несущественна.

При недопустимости включения сопротивлений в фильтруемый провод применяются дроссели. Они имеют собственную распределенную емкость и собственную резонансную частоту. Вследствие этого реактивное сопротивление любого дросселя при изменении частоты сначала имеет индуктивный характер и растет с повышением частоты, затем принимает максимальное значение, после чего оно становится емкостным и с повышением частоты падает. При дальнейшем повышении частоты дроссель, как и любая другая цепь с распределенными параметрами, на некоторых частотах ведет себя как последовательный резонансный контур, его сопротивление может достигать малых величин и действие фильтра на этих частотах окажется незначительным. Чтобы получить развязку во всем необходимом диапазоне частот, не следует применять в фильтре слишком большие индуктивности, а собственную резонансную частоту катушек надо подбирать так, чтобы она была выше или не более чем на 20...30 % ниже самой высокой из подавляемых частот.

Если катушка намотана на каркасе из изоляционного материала, то согласно экспериментальным данным ее собственная длина волны  $\lambda_0 = 3l$ , где  $l$  – длина провода катушки. Часто однослойные дроссели наматывают на стержнях из магнетодиэлектрика. Такие дроссели имеют меньшие размеры при этой же индуктивности.

Можно обходиться и без катушек, заменив их «безвитковыми дросселями» – трубчатыми ферритовыми цилиндрами, надеваемыми на отрезки проводов между точками подключения  $Z_2, Z_4, Z_6, \dots$  (см. рис. 6.1). Индуктивное сопротивление такого дросселя мало и для получения нужной ЭФ приходится уменьшать сопротивления  $Z_2, Z_4, Z_6, \dots$  и увеличивать число ячеек.

В параллельные ветви  $Z_2, Z_4, \dots$  (см. рис. 6.1) включают конденсаторы, с помощью которых создается минимально возможное сопротивление этих ветвей. При выборе конденсатора следует учитывать не только его емкость, но и собственную индуктивность, включая индуктивность выводов, так как индуктивное сопротивление конденсатора на ВЧ может превосходить емкостное.

Эффективность фильтрации фильтра рассчитывают по (6.1). Если фильтр начинается с резистора или дросселя, то сопротивление  $Z_i$  представляет собой геометрическую сумму сопротивлений резистора или дросселя и выходного

сопротивления ИН. Если фильтр начинается с конденсатора, то  $Z_i$  – это выходное сопротивление ИН.

**Пример 6.1.** Определить ЭФ трехъячеечного фильтра, начинающегося с конденсатора, при условии, что  $\nu = 1$  МГц и выходное сопротивление ИН  $r_{\text{ИН}} = 100 \text{ Ом} = Z_i$ . В качестве последовательных сопротивлений применены резисторы  $r = Z_3 = Z_6 = 50 \text{ Ом}$ . Емкость конденсаторов  $C = 0,047 \text{ мкФ}$ .

$$\text{ЭФ} = Z_1/Z_2 - Z_3/Z_4 - Z_5/Z_6 = r_{\text{ИН}} \omega C \cdot r \omega C \cdot r \omega C = r_{\text{ИН}} \omega^3 C^3 = 100 \cdot 2^3 \cdot 10^{18} \cdot 0,047^3 \cdot 10^{-18} \cdot 50^2 = 6440;$$

$$B = 8,8 \text{ Нп}, \quad A = 76 \text{ дБ}.$$

Основные требования, предъявляемые к защитным фильтрам, заключаются в следующем:

1. Величины рабочих напряжения и тока фильтра должны соответствовать величинам напряжения и тока цепи, в которой фильтр установлен.

2. Эффективность ослабления нежелательных сигналов должна быть не меньше заданной в защищаемом диапазоне частот.

3. Ославление полезного сигнала в полосе прозрачности фильтра должно быть незначительным, не влияющим на качество функционирования системы.

4. Габариты и масса фильтров должны быть по возможности минимальными.

5. Фильтры должны обеспечивать функционирование при определенных условиях эксплуатации (температура, влажность, удары, вибрация и т. д.).

6. Конструкции фильтров должны соответствовать требованиям техники безопасности.

### Фильтры нижних частот

Фильтр, у которого полоса прозрачности простирается от  $\omega = 0$  (постоянный ток) до некоторой граничной частоты  $\omega_0$ , называется фильтром нижних частот (ФНЧ). На рис. 6.2 изображена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) идеального ФНЧ – (сплошная линия) в координатах  $a(\omega)$  и  $K(\omega)$ , где  $a$  и  $K$  – затухание и коэффициент передачи фильтра соответственно.

Для частот  $\omega \in [0, \omega_{\text{гр}}]$  фильтр совершенно прозрачен ( $a = 0, K = 1$ ), а частоты  $\omega > \omega_{\text{гр}}$  абсолютно не пропускает ( $a \rightarrow \infty, K = 1$ ). Реальный ФНЧ не может иметь такой АЧХ. Ее следует рассматривать как предел, к которому в той или иной степени можно стремиться.

Реальная АЧХ ФНЧ имеет вид, представленный на рис. 6.2 пунктирной линией.

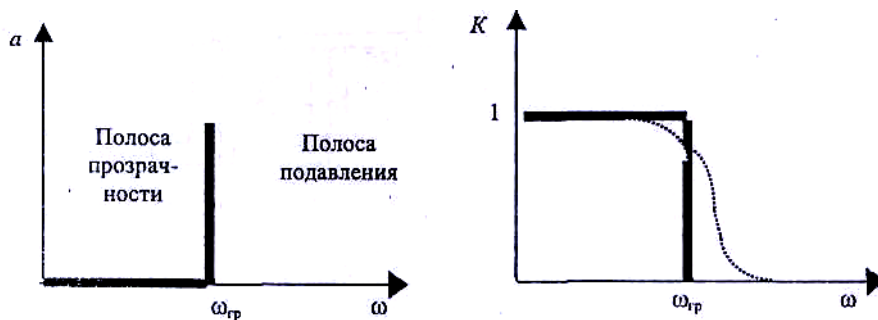


Рис. 6.2. Амплитудно-частотная характеристика ФНЧ

Последовательная ветвь ФНЧ должна иметь ничтожное сопротивление для постоянного тока и нижних частот. Вместе с тем, для того чтобы высшие частоты задерживались фильтром, последовательное сопротивление должно расти с частотой. Этим требованиям удовлетворяет индуктивность  $L$ .

Параллельная ветвь ФНЧ, наоборот, должна иметь малую проводимость для низких частот, для того чтобы токи этих частот не шунтировались параллельным плечом. Для высоких частот параллельная ветвь должна иметь большую проводимость, тогда колебания этих частот будут ею шунтироваться, и их ток на выходе фильтра будет ослабляться. Таким требованиям отвечает емкость  $C$ .

### Фильтры верхних частот

Фильтр, у которого полоса прозрачности занимает все частоты выше некоторой определенной граничной частоты  $\omega$ , называется фильтром верхних частот (ФВЧ). На рис. 6.3 изображены схемы и АЧХ (идеального – сплошная линия и реального – пунктирная линия) ФВЧ.

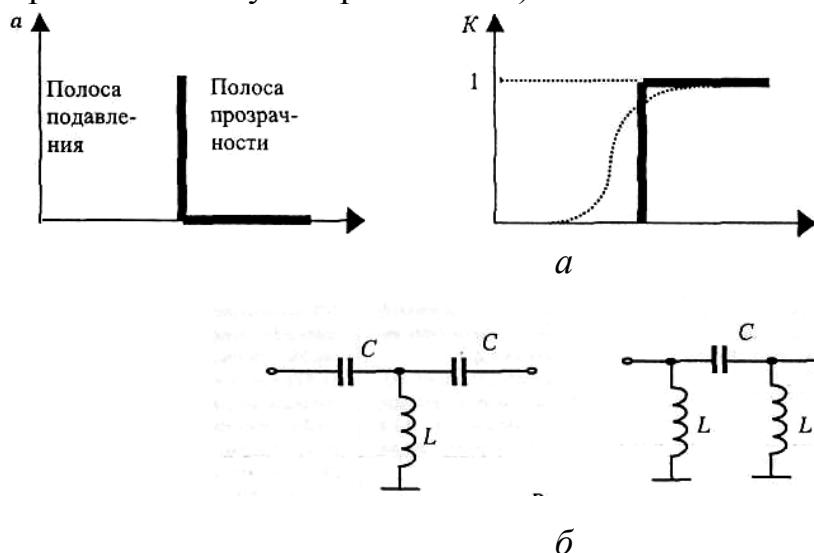


Рис. 6.3. АЧХ (а) и схемы (б) ФВЧ

В таком фильтре постоянный ток и все колебания с частотами ниже определенной граничной частоты должны задерживаться, а колебания частот  $\omega > \omega_{гр}$  – беспрепятственно пропускаться. Если в качестве последовательного плеча фильтра включить емкость (см. рис. 6.3), она будет представлять большое

сопротивление для низких частот и способствовать их задержанию. Включение в параллельную ветвь индуктивности приведет к увеличению проводимости ее на нижних частотах и уменьшению проводимости на высоких частотах. Это также будет соответствовать требованиям, предъявляемым к ФВЧ.

### Полосовые и заграждающие (режекторные) фильтры

Полосовые фильтры характеризуются тем, что обе частоты  $\omega_{гр1}$  и  $\omega_{гр2}$ , ограничивающие полосу прозрачности, конечны и ни одна из них не равна нулю (рис. 6.4).

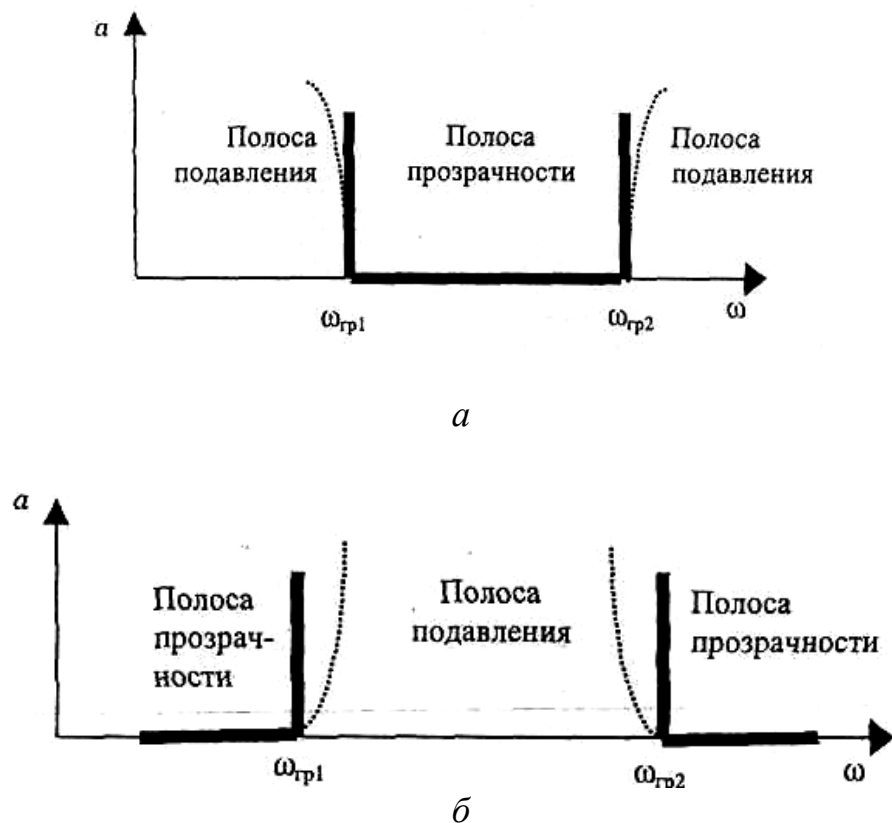


Рис. 6.4. АЧХ полосового (а) и заграждающего (б) фильтров

В ряде случаев ставится задача задержания определенной полосы частот и в то же время пропускания всех остальных частот. Такая задача решается заграждающим фильтром.

На рис. 6.5 представлены варианты построения схем полосовых фильтров.

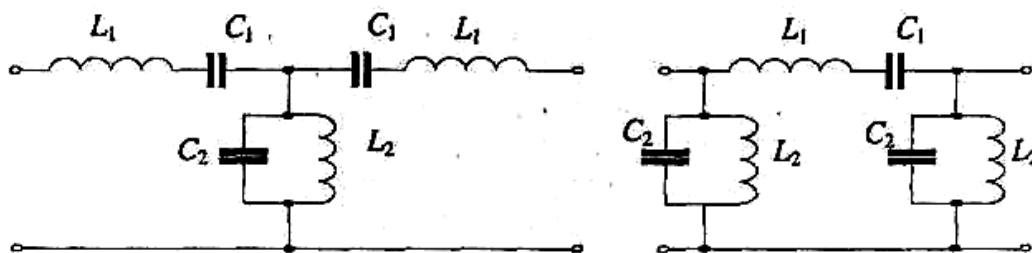


Рис. 6.5. Схемы полосовых фильтров

По заданию преподавателя студенты выбирают схему фильтра для указанного диапазона частот и рассчитывают его эффективность.

### **Методические указания**

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают физические основы фильтрации электрических сигналов.
2. Изображают электрические схемы и амплитудно-частотные характеристики фильтров нижних и верхних частот, полосового фильтра.
3. По заданию преподавателя определяют эффективность фильтрации фильтра нижних частот при изменении количества RC-звеньев от одного до трех при фиксированной частоте и параметрах элементов RC-звена.
4. По заданию преподавателя определяют эффективность фильтрации трехзвенного фильтра нижних частот при изменении значения последовательного сопротивления и при фиксированной емкости конденсатора RC-звена и частоте.
5. По заданию преподавателя определяют эффективность фильтрации трехзвенного фильтра нижних частот при изменении значения емкости конденсатора и при фиксированном значении последовательного сопротивления RC-звена и частоте.
6. Анализируют рассчитанные значения эффективности фильтрации и делают рекомендации по ее повышению.

## Практическое занятие №7

### ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в реализации теоретических основ экранирование электромагнитного поля излучения и оценки его эффективности.

#### Теоретические сведения

Экранирование происходит благодаря отражению электромагнитной волны от металлической поверхности экрана и затуханию преломленной волны в теле экрана. Пусть (рис. 7.1) у падающей плоской волны  $P_{\text{пад}}$  векторы электрического  $E_{\text{пад}}$  и магнитного  $H_{\text{пад}}$  полей параллельны плоскости экрана. В точке 1, находящейся на границе сред воздух – металл волна  $P_{\text{пад}}$  частично отразится (волна  $P_1$ ) и частично преломится (волна  $P_{1М}$ ). Распространяясь в металлической среде, преломленная волна  $P_{1М}$  затухает по экспоненциальному закону, и в точке 2 напряженности обоих полей будут в  $e^{\delta_{\text{кр}}/\delta}$  раз меньше, чем в точке 1. В точке 2 снова произойдет преломление и отражение от границы сред металл – воздух. Преломленная волна  $P_2$  выйдет в экранируемое пространство, а отраженная  $P_{2М}$  будет затухать, и в точке 3 напряженности полей будут в  $e^{2\delta_{\text{кр}}/\delta}$  раз меньше, чем в точке 1. Затем будут происходить отражения в точках 3, 4, 5, ... до полного затухания волны в металле. В экранируемое пространство будут проникать волны  $P_2, P_4, P_6, \dots$ , преломленные в точках 2, 4, 6 ... . Их суммарное воздействие определяет напряженности полей  $E$  и  $H$  в этом пространстве. Напряженности полей волны  $P_4$  будут в  $e^{2\delta_{\text{кр}}/\delta}$  раз меньше, чем  $P_2$ , и т. д. Экранирование электромагнитного поля излучения может представлять интерес на частотах выше 10 МГц, на которых согласно табл. 7.1  $\delta_{\text{экр}} > 2\delta$ , при толщине любых применяемых материалов  $\delta_{\text{экр}} > 0,1$  мм. Взяв минимальное соотношение  $\delta_{\text{экр}} = 2\delta$ , получим, что напряженность поля волны  $P_4$  будет в  $e^4 = 55$  раз меньше, чем  $P_2$ . Можно считать, что из всех волн в экранируемое пространство проникает только волна  $P_2$ , допускаемая при этом ошибка не превосходит 2 %.

Отсюда получается, что

$$\mathcal{E} = E_{\text{пад}} / E_2 = H_{\text{пад}} / H_2 = e^{\delta_{\text{кр}}/\delta} Z_{C \text{ возд}} / 4Z_{C \text{ мет}}, \quad (7.1)$$

где  $Z_{C \text{ возд}} = 377$  Ом – характеристическое сопротивление вакуума (и воздуха);

$$Z_{C \text{ мет}} = \sqrt{\omega\mu/\sigma} - \quad (7.2)$$

модуль характеристического сопротивления металла, который в сотни и тысячи раз меньше характеристического сопротивления воздуха. Входящее в (7.1) отношение  $Z_{C \text{ возд}}/4Z_{C \text{ мет}}$  является приближенным значением произведения коэффициентов преломления на границах сред: воздух – металл и металл – воздух.



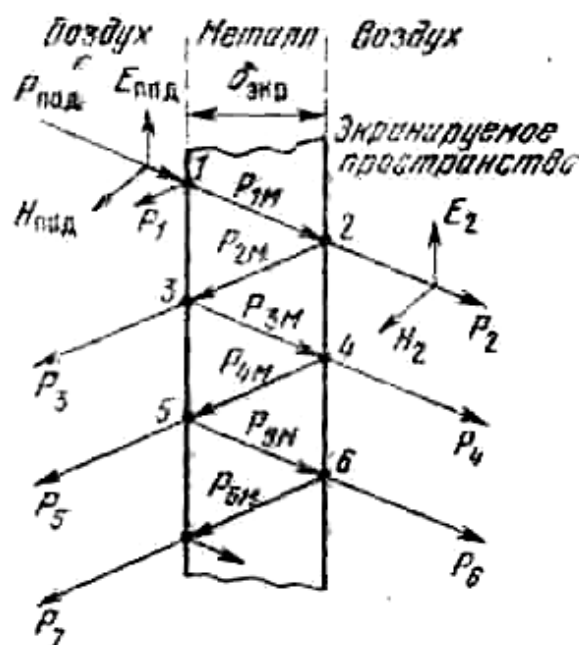


Рис. 7.1. Схема экранирования электромагнитного поля излучения

Таблица 7.1

ЭГП ( $\delta$ ) для различных экранирующих материалов, мм

Частота $\nu$ , Гц	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
				$\mu_r = 50$	$\mu_r = 100$	
$10^2$	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
$10^3$	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
$10^4$	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
$10^5$	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
$10^6$	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
$10^7$	0,2100	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
$10^8$	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—

**Пример 7.1.** Определить эффективность экрана из алюминиевой фольги толщиной  $\delta_{\text{экр}} = 0,1$  мм на частоте  $\nu = 10$  МГц.

Из табл. 7.1 имеем:  $\delta = 0,0275$  мм;

$$\delta_{\text{экр}} / \delta = 0,1 / 0,0275 = 3,6;$$

$$Z_{C \text{ мет}} = \sqrt{2\pi \cdot 10^7 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} / 33 \cdot 10^4} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$\Theta = e^{3,6} \cdot 377 / 4 \cdot 1,55 \cdot 10^{-3} = 2,27 \cdot 10^6;$$

$$B = 14,7 \text{ Нп}, \quad A = 127 \text{ дБ}.$$

### Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают физические основы экранирования электромагнитного поля излучения.

2. Изображают схему экранирования электромагнитного поля излучения.
3. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана, параметры которых приведены в табл. 7.1 на фиксированной частоте.
4. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана при различных значениях толщины стенки на фиксированной частоте.
5. По заданию преподавателя определяют эффективность экранирования для магнитного и немагнитного материалов экрана при постоянной толщине стенки экрана в диапазоне частот  $10^2 \dots 10^6$  Гц.
6. Анализируют рассчитанные значения эффективности экранирования и делают рекомендации по ее повышению.

## **Практическое занятие №8**

### **УТЕЧКА ИНФОРМАЦИИ ПО ЦЕПЯМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ**

*Цель занятия:* приобрести практические навыки в анализе параметров утечки информации по цепям заземления.

#### **Теоретические сведения**

Заземлением называется преднамеренное соединение объекта с заземляющим устройством. Заземление осуществляется путем создания системы проводящих поверхностей и электрических соединений, предназначенных для выполнения различных функций.

Защитное заземление предназначено для исключения поражения обслуживающего персонала электрическим током. Защитное заземление должно поддерживать элементы конструкции при одном и том же потенциале, равном или близком к потенциалу «земли», и обеспечивать низкоомную нагрузку для больших токов, возникающих в системах при аварийных ситуациях. Как правило, защитные заземления должны иметь хороший низкоомный контакт с «землей», поэтому их часто называют наружными заземлителями. Наружные заземлители осуществляют заземление силовых систем, радиочастотных антенн, молниеотводов, стекателей статического электричества и т. д.

Рабочие заземления включают в себя заземление силового оборудования (сильноточных цепей) и сигнальное или схемное заземление, которое обеспечивает формирование опорного потенциала, необходимого для работы электронных схем.

Заземление экранирующих поверхностей способствует ослаблению нежелательных связей и является составной частью системы экранирования. Проводящие поверхности и электрические соединения системы заземления экранов предназначены для протекания обратных токов в сигнальных цепях и цепях электропитания.

Одной из причин попадания опасного сигнала в систему заземления является наличие электромагнитного поля – носителя опасного сигнала в местах расположения элементов системы заземления. Это электромагнитное поле будет наводить в расположенной поблизости системе заземления ток опасного сигнала. Аналогичным образом опасные сигналы могут наводиться на цепь, образуемую нулевым проводом, через который ток опасного сигнала будет попадать в систему заземления и далее в грунт. Величина тока опасного сигнала в этом случае будет определяться интенсивностью воздействующего электромагнитного поля, сопротивлением цепей заземления и проводимостью почвы.

Проникновение опасного сигнала в цепи заземления может быть связано с образованием так называемых контуров заземления. Рассмотрим два устройства, соединенные парой проводников, один из которых является сигнальным, а другой служит для протекания обратных токов (рис. 8.1).

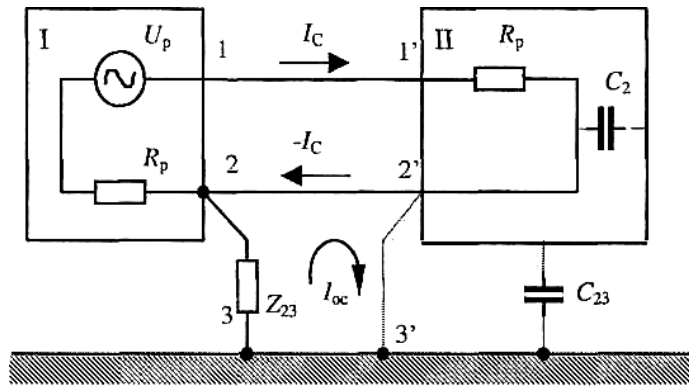


Рис. 8.1. Схема соединения устройств

Пусть возвратный проводник соединен с корпусом первого (I) устройства, а корпус – с землей. Если этот проводник соединен с корпусом второго (II) устройства, также имеющего электрический контакт с «землей» (соединение 2'–3'), то образуется замкнутый проводящий контур 2–2'–3'–3–2. Внешнее электромагнитное поле источника опасного сигнала наводит в этом контуре ЭДС, вызывая протекание тока  $I_{о.с.}$ , который в свою очередь создает на участке 2–3 падение напряжения  $U_{о.с.}$ , равное

$$U_{о.с.} = I_{о.с.} \cdot Z_{2-3}, \quad (8.1)$$

где  $Z_{2-3}$  – сопротивление участка цепи 2–3.

Если отсутствует проводник 2'–3' или соединение проводника 2–2' с корпусом второго устройства, то возможность образования контура заземления полностью не исключается. В этих случаях контур может состоять из проводников 2–2', 3–3', земляной шины и паразитных емкостей между сигнальной цепью и корпусом второго устройства  $C_2$ , а также между корпусом второго устройства и землей  $C_{2-3}$ .

Еще одна причина появления опасного сигнала в цепи заземления связана с конечным значением величины сопротивления заземляющих проводников. По заземляющему проводнику протекает обратный электрический ток опасного сигнала (рис. 8.2).

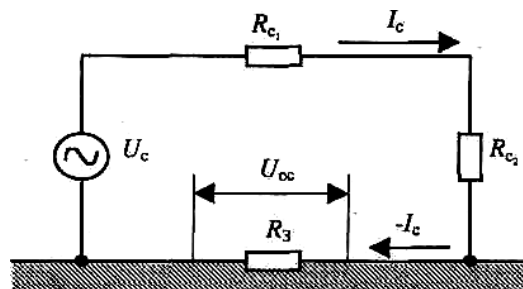


Рис. 8.2. Цепи протекания прямого и обратного токов

Из-за конечного сопротивления  $R_3$  земляной шины на этом сопротивлении создается падение напряжения:

$$U_{o.c} = \frac{U_c R_3}{R_{c_1} + R_{c_2} R_3}, \quad (8.2)$$

где  $U_c$  – напряжение источника сигнала;

$R_{c_1}$ ,  $R_{c_2}$  – внутреннее сопротивление источника сигнала и сопротивление нагрузки соответственно. При  $R_{c_1} + R_{c_2} \gg R_3$ :

$$U_{o.c} = \frac{U_3 R_3}{R_{c_1} + R_{c_2}}. \quad (8.3)$$

Например, при  $R_{c_1} = R_{c_2} = 100$  Ом,  $R_3 = 10^{-2}$  Ом и  $U_c = 5$  В падение напряжения на сопротивлении  $R_3$  составит:

$$U_{o.c} = \frac{5 \cdot 10^{-2}}{200} = 250 \text{ мкВ}.$$

Напряжение опасного сигнала в цепи заземления будет тем больше, чем больше величина сопротивления  $R_3$ .

Утечка информации за счет цепей заземления может также происходить вследствие того, что общая земля служит обратным проводом для различных контуров. Рассмотрим ситуацию, представленную на рис. 8.3.

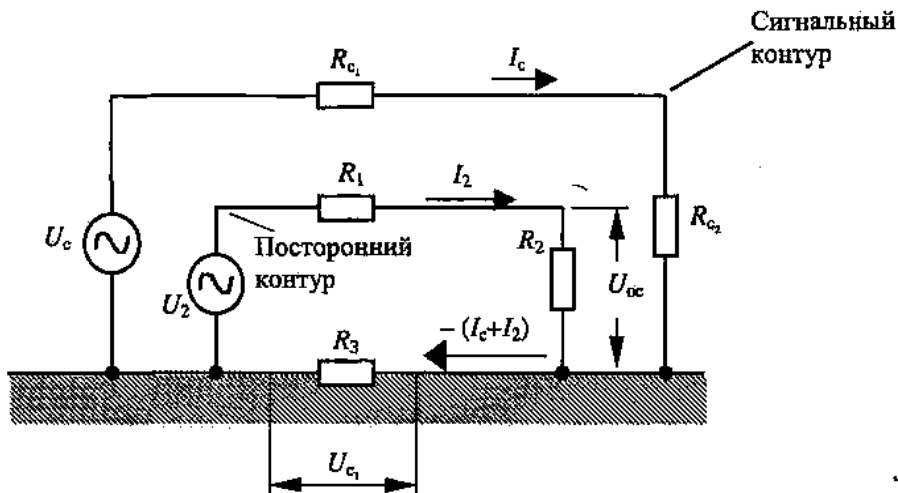


Рис. 8.3. Схема расположения сигнального и постороннего контуров

В этом случае для двух различных контуров – сигнального и постороннего – общая земля является обратным проводом с эквивалентным сопротивлением.

На эквивалентном сопротивлении земли  $R_3$  возникает падение напряжения за счет протекания обратного тока опасного сигнала  $I_c$ , равное:

$$U_{c_1} = \frac{R_3 U_c}{R_{c_1} + R_{c_2} + R_3} \approx \frac{R_3 U_c}{R_{c_1} + R_{c_2}} \text{ при } R_{c_2} \ll R_{c_1} + R_{c_2}, \quad (8.4)$$

где  $R_{c_1}$ ,  $R_{c_2}$  – внутреннее сопротивление источника опасного сигнала  $U_c$  и сопротивление нагрузки в цепи сигнального контура.

На сопротивлении нагрузки  $R_2$  постороннего контура имеет место падение напряжения  $U_{o.c}$ , вызванное протеканием обратного тока опасного сигнала  $I_c$  по общей цепи заземления, которое равно

$$U_{o.c} = \frac{R_2 U_{c1}}{R_1 + R_2} \quad \text{при } R_3 \ll R_1 + R_2, \quad (8.5)$$

где  $R_1$  – внутреннее сопротивление источника напряжения  $U_2$  в цепи постороннего контура. Подставив (8.4) в (8.5), получим выражение для определения величины падения напряжения опасного сигнала на нагрузке постороннего контура:

$$U_{o.c} = \frac{R_2 R_3 U_c}{(R_1 + R_2)(R_{C1} + R_{C2})}. \quad (8.6)$$

Пусть, например,  $R_{C1} = R_{C2} = 100 \text{ Ом}$ ,  $U_c = 5 \text{ В}$ ,  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ МОм}$ ,  $R_3 = 0,2 \text{ Ом}$ .

В этом случае  $U_{o.c} = 5 \text{ мВ}$ , т. е. напряжение опасного сигнала на нагрузке постороннего контура будет достаточно велико.

Возможность утечки информации, связанная с цепями заземления, обусловлена также наличием электромагнитного поля опасного сигнала в грунте вокруг заземлителя. Из-за большого затухания, вносимого грунтом, магнитное поле в землю практически не проникает. Электрическое поле в земле определяется величиной потенциала заземлителя и параметрами грунта, где происходит растекание тока опасного сигнала. С помощью дополнительных, специально установленных заземлителей можно осуществить перехват опасного сигнала (рис. 8.4).

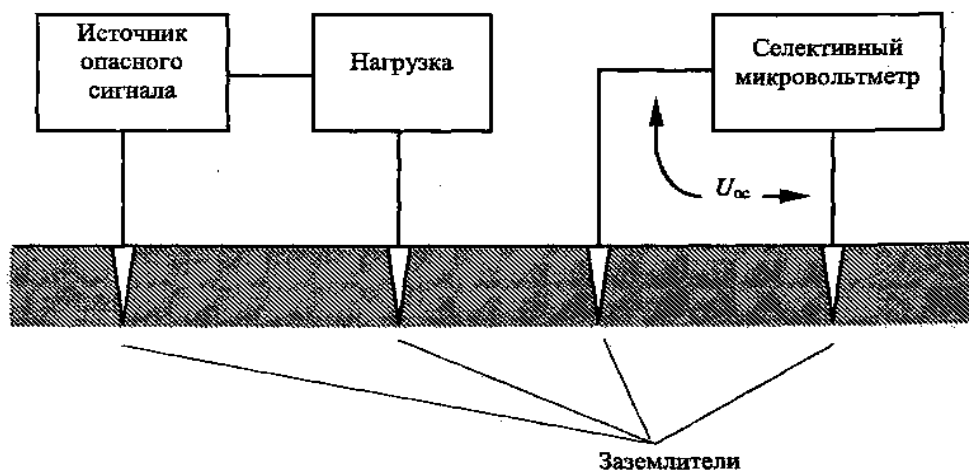


Рис. 8.4. Схема перехвата опасного сигнала

По заданию преподавателя студенты рассчитывают величину опасного сигнала, наводимого на сопротивлении постороннего контура.

## Методические указания

На данном практическом занятии студенты выполняют следующие задания:

1. Изучают причину утечки информации по цепям заземления.
2. Изображают схему расположения сигнального и постороннего контуров.
3. По заданию преподавателя определяют напряжение опасного сигнала на нагрузке постороннего контура для разных значений сопротивления земляной шины.
4. По заданию преподавателя определяют напряжение опасного сигнала на нагрузке постороннего контура для разных значений сопротивления нагрузки.
5. Анализируют рассчитанные значения напряжения опасного сигнала на нагрузке постороннего контура и делают рекомендации по его снижению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абалмазов, Э. И. Методы и инженерно-технические средства противодействия информационным угрозам / Э. И. Абалмазов. – М. : Изд-во «Компания „Гротек“», 1997.
2. Балахничев, И. Н. Коммерческие электронные схемы / И. Н. Балахничев, А. В. Дрик. – Минск : Битрикс, 1997.
3. Балахничев, И. Н. Практическая телефония / И. Н. Балахничев, А. В. Дрик. – Минск : Наш город, 1998.
4. Балахничев, И. Н. Экспериментальная электроника / И. Н. Балахничев, А. В. Ровдо, А. В. Дрик. – Минск : Битрикс, 1999.
5. Бондарев, В. Применение микросхемы К174ПС1 / В. Бондарев, А. Рукавишников // Радио. – 1989. – №2.
6. Василев, М. ЧМ микропередатчик / М. Василев // Конструктор. – 2000. – №1.
7. Виноградов, Ю. Датчик вибрации для охранного устройства / Ю. Виноградов // Радио. – 1994. – №12.
8. Виноградов, Ю. ИК линия связи в охранной сигнализации / Ю. Виноградов // Радио. – 1998. – №2.
9. Горланд, Р. Простейший ЧМ приемник / Р. Горланд // Electronics World incorporating Wireless World. – 2000. – №4.
10. Граф, Р. Ф. Энциклопедия электронных схем / Р. Ф. Граф, В. Шните. – М. : ДМК, 2000. – Т. 7, Ч. 2.
11. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1988.
12. Исаев, А. СВЧ датчик движения для охранной сигнализации / А. Исаев // Радио. – 2002. – №12.
13. Койнов, А. Ультразвуковое охранное устройство / А. Койнов // Радио. – 1998. – №7.
14. Крупа, А. Борьба с телефонным пиратством / А. Крупа, И. Н. Балахничев, А. В. Дрик. – Минск : Битрикс, 1999.
15. Нечаев, И. Звуковое сопровождение без проводов / И. Нечаев // Радио. – 1998. – №10.
16. Пейтон, А. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Пейтон, В. Волш ; пер. с англ. – М. : БИНОМ, 1994.
17. Петраков, А. В. Основы практической защиты информации / А. В. Петраков. – М. : Радио и связь, 1999.
18. Петраков, А. В. Охрана и защита современного предприятия / А. В. Петраков, П. С. Дорошенко, Н. В. Савлуков. – М. : Энергоатомиздат, 1999.
19. Радиоприемное устройство / под ред. А. П. Жуковского. – М. : Высш. шк., 1989.



20. Ред, Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника / Э. Ред ; пер с нем. – М. : Мир, 1990.
21. Торокин, А. А. Основы инженерно-технической защиты информации / А. А. Торокин. – М. : Ось-89, 1998.
22. Уваров, А. С. Устройство для снятия информации со стекла / А. С. Уваров // Радиоконструктор. – 2001. – №3.
23. Федоров, В. СВЧ делитель для частотомера / В. Федотов // Радиолюбитель. – 2000. – №3.
24. Фролов, Е. УКВ ЧМ приемник на 145 МГц / Е. Фролов, В. Долманов, Н. Березкин // Радио. – 1991. – №3.
25. Хореев, А. А. Защита информации от утечки по техническим каналам : учеб. пособие. Ч. 1 : Технические каналы утечки информации / А. А. Хореев. – М. : Гостехкомиссия России, 1998.
26. Чистов, В. Детектор радиоволн / В. Чистов // Радио. – 1998. – №10.
27. Шелестов, И. П. Радиолюбителям – полезные схемы / И. П. Шелестов. – М. : СОЛОН-Р, 2003. – Ч. 3.
28. Шило, В. Т. Популярные цифровые микросхемы : справочник / В. Т. Шило. – М. : Радио и связь, 1988.
29. «Шпионские штучки» и устройства для защиты объектов и информации : справ. пособие / В. И. Андрианов [и др.]. – СПб. : Лань, 1996.

*Учебное издание*

## **ТЕОРИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности  
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»  
всех форм обучения

Составители:

**Будник** Артур Владимирович  
**Галузо** Валерий Евгеньевич  
**Логин** Владимир Михайлович

Редактор Е. Н. Батурчик  
Корректор Л. А. Шичко

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 2,5.

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 735.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6